

# 汕头港浮游植物组成特征及其与环境的关系\*

杜虹\*\* 王亮根 曹会彬 陈伟洲

(汕头大学理学院生物系, 广东汕头 515063)

**摘要** 于2009年3月—2010年3月对汕头港生态环境进行连续监测,研究了浮游植物组成及其对环境条件的敏感程度。结果表明:研究区共鉴定出322种浮游植物,包含了234种硅藻、141种淡水和半咸水种以及64种赤潮生物;浮游植物丰度、Shannon指数和均匀度指数分别是 $3127.6 \times 10^4 \text{ cells} \cdot \text{m}^{-3}$ 、2.53和0.57;中肋骨条藻(*Skeletonema costatum*)和颤藻(*Oscillatoria* sp.)是全年优势种,优势度分别是0.066和0.038;浮游生物数量组成结构与温度明显相关( $r=0.699, P<0.01$ )。浮游植物与环境因子之间的相关性分析显示,透明度是汕头港浮游植物生长主要限制因子。比较浮游植物数量组成与环境因子间的相关程度发现,上游输入是汕头港污染物的重要来源之一。多维尺度与Pearson相关性分析显示,汕头港浮游植物群落结构变化主要受温度、盐度与pH影响。

**关键词** 生态类群; 种类组成; 丰度; 物种多样性

**中图分类号** Q171.1, X17 **文献标识码** A **文章编号** 1000-4890(2011)8-1757-09

**Phytoplankton community composition and its relationships with the environment in Shantou Harbor of South China.** DU Hong\*\*, WANG Liang-gen, CAO Hui-bin, CHEN Wei-zhou (Department of Biology, College of Science, Shantou University, Shantou 515063, Guangdong, China). *Chinese Journal of Ecology*, 2011, 30(8): 1757–1765.

**Abstract:** Based on the monitoring data of the eco-environment in Shantou Harbor from March 2009 to March 2010, this paper studied the composition of phytoplankton community and its sensitivity to the environment in the Harbor. A total of 322 phytoplankton species were identified, including 234 diatom species, 141 fresh-water and brackish water species, and 64 red tide species. The average abundance, Shannon index, and evenness index of the community were  $3127.6 \times 10^4 \text{ cells} \cdot \text{m}^{-3}$ , 2.53, and 0.57, respectively, and *Skeletonema costatum* and *Oscillatoria* sp. were the dominant species throughout the year, with the dominance index being 0.066 and 0.038, respectively. There was a significant positive correlation between phytoplankton community composition and water temperature ( $r=0.699, P<0.01$ ), and the phytoplankton growth was mainly limited by water transparency. The relevance degree of phytoplankton composition and environmental factors showed that upstream input was an important source of Shantou Port pollutants, and the multi-scale and Pearson correlation analyses indicated that water temperature, salinity, and pH were the main factors affecting the phytoplankton community composition.

**Key words:** ecological group; species composition; abundance; species diversity.

汕头港位于广东省汕头市区内,是一以潮汐作用为主的半封闭的河口湾,由牛田洋和珠池肚2个藕节状海湾构成,其中牛田洋是汕头市重要的海水养殖基地,而珠池肚则是汕头内港最为繁忙的作业

区域;港区水域长 $1.03 \times 10^4 \text{ m}$ ,面积 $3.50 \times 10^7 \text{ m}^2$ ,航道宽800 m,水深5~11 m(陈则实,1997)。近年来随着汕头经济的快速发展,汕头港环境质量明显恶化,2005—2008年海洋环境质量报告都显示汕头港受到无机氮、磷的严重污染(汕头市海洋与渔业局,2006,2007,2008,2009)。浮游植物组成因其结构复杂且对环境条件改变敏感而成为重要的自然指标(Livingston,2001),能够反映汕头港生态体系的质

\* 广东省海洋与渔业局项目(A200899J01)、广东省渔业生态环境重点实验室开放基金项目(LFE-2009-03)和广东高校产学研结合示范基地科技成果转化重大项目(cgzhzd0812)资助。

\*\* 通讯作者 E-mail: hdu@stu.edu.cn

收稿日期: 2010-12-27 接受日期: 2011-05-19

量状况;结合浮游植物结构组成与其主要控制因子(如光照、温度、盐度、湍流、营养盐)的关系,则能为汕头港避免赤潮发生的提供科学依据,促进汕头港的可持续发展。

最近一次关于汕头港浮游植物的调查要追溯到1991—1992年。为了解汕头港生态环境质量,有必要对汕头港浮游植物数量与结构组成进行长期跟踪调查。本次调查在分析汕头港浮游植物的分布与组成基础上,探讨了富营养化水平下汕头港浮游植物的数量、组成和多样性与环境因子间的相互关系。

1 研究地区与研究方法

1.1 站位布设和采样

于2009年3月—2010年3月对汕头港水质进行连续调查,采样频率为每月1次,在调查区域设置6个站点: $S_1$ 站(116.741°E,23.342°N)位于湾口的妈屿岛附近, $S_2$ 站(116.728°E,23.345°N)位于珠池深水港码头, $S_3$ 站(116.708°E,23.346°N)位于龙湖沟西侧的航道内, $S_4$ 站(116.682°E,23.348°N)位于

广场轮渡附近, $S_5$ 站(116.658°E,23.346°N)位于西港河口处, $S_6$ 站(116.634°E,23.342°N)位于汕头港与牛田洋分界处(图1)。

1.2 浮游植物采集和分析

浮游植物样品的采集分网采定性性与瓶采定量,按照《海洋调查规范(第6部分):海洋生物调查》实施(GB/T 12763.6-1991)(国家海洋局,1991)。浮游植物定性样品用浅水Ⅲ型浮游生物采集网从底至表拖网,用中性福尔马林溶液固定用于种类组成的分析;定量样品使用HQM-1型有机玻璃采水器(2.5 L)取表层和底层海水水样,每升水样加15 ml 鲁哥氏液固定后,通过沉降法将水样浓缩10倍,用于浮游植物数量统计。取1 ml 样品于Sedgewick-Rafte浮游植物计数框中,在Olympus BH-2普通光学显微镜下统计物种数量与丰度。

1.3 数据分析

浮游植物的多样性统计分析采用如下公式:  
Shannon 指数(Shannon & Weaver,1949):

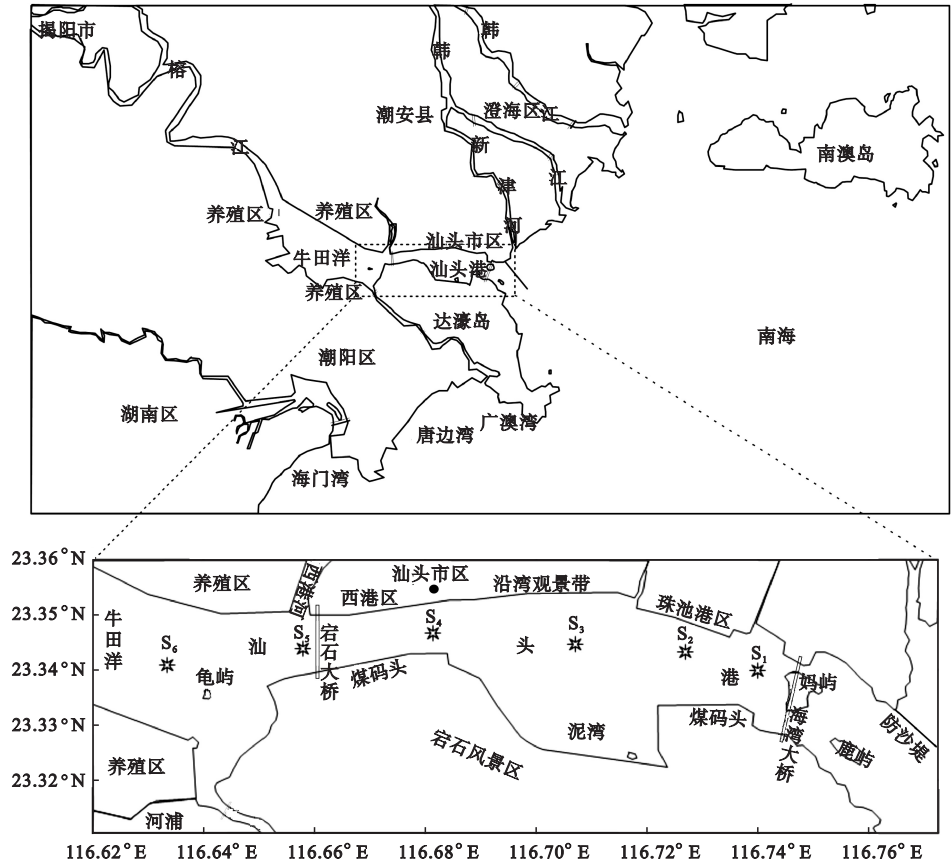


图1 汕头港环境调查站位分布示意图  
Fig.1 Location of sampling stations in Shantou Harbor

$$H' = - \sum_{i=1}^s P_i \log_2 P_i \quad (P_i = N_i/N)$$

$$P_i \log_2 P_i (P_i = N_i/N)$$

均匀度指数 (evenness index) (Pielou, 1969):

$$J = H'/\log_2 S$$

McNaughton 优势指数 (McNaughton, 1967):

$$D = n_s / N_s$$

优势度 (dominance index) (徐兆礼和陈亚瞿, 1989):

$$Y = D \times f_i$$

式中:  $N_i$  为第  $i$  种的个体数,  $N$  为样品中的总个体数,  $P_i$  为第  $i$  种的个体数与样品总个数的比值,  $S$  为总种数,  $n_s$  为第  $S$  站某种浮游植物的数量,  $N_s$  为第  $S$  站浮游植物总数,  $f_i$  分别为该种在各样品中出现的频率,  $Y < 0.02$  的种类为优势种 (徐兆礼和陈亚瞿, 1989)。

多维尺度分析 (multidimensional scaling, MDS) 和相关性分析通过 SPSS 15.0 实现。在分析前将浮游植物丰度进行开 4 次方预处理; MDS 的分析矩阵通过基于最远相邻法 (furthest neighbor) 和欧氏距离法 (Euclidean distance) 的分层聚类分析获取; 相关性分析采用 Pearson 相关系数法。

## 2 结果与分析

### 2.1 浮游植物的种类组成

共鉴定出浮游植物 322 种 (包括 15 个变种、5 个变型和 15 个不确定种), 分属蓝藻 (Cyanophyta)、黄藻 (Xanthophyta)、金藻 (Chrysophyta)、甲藻 (Dinophyta)、硅藻 (Bacillariophyta)、裸藻 (Euglenophyta) 和绿藻 (Chlorophyta) 7 门 9 纲 19 目 40 科 114 属。其中, 硅藻 234 种, 占物种总数的 72.6%, 中心纲硅藻 (Centricae) 与羽纹纲硅藻 (Pennatae) 各占细胞丰度的 0 ~ 98.09% 和 0 ~ 1, 平均值各为 46.55% 和 13.18%; 绿藻 47 种, 占物种总数的 14.6%, 占细胞丰度的 0 ~ 83.92%, 平均值为 12.33%; 甲藻 19 种, 占物种总数的 5.9%, 占细胞丰度的 0 ~ 22.86%, 平均值为 1.32%; 蓝藻 13 种, 占物种总数的 4.0%, 占细胞丰度的 0 ~ 95.89%, 平均值为 23.69%; 裸藻 6 种, 占物种总数的 1.9%, 占细胞丰度的 0 ~ 22.86%, 平均值为 0.71%; 金藻 2 种, 占物种总数的 0.6%, 占细胞丰度的 0 ~ 1.92%, 平均值为 0.02%; 黄藻 1 种, 占物种总数的 0.3%, 占细胞丰度的 0 ~ 1.22%, 平均值为 0.03% (图 2)。有淡水和半咸水种 141 种, 赤潮种 64 种。S<sub>2</sub> 站检出的浮游

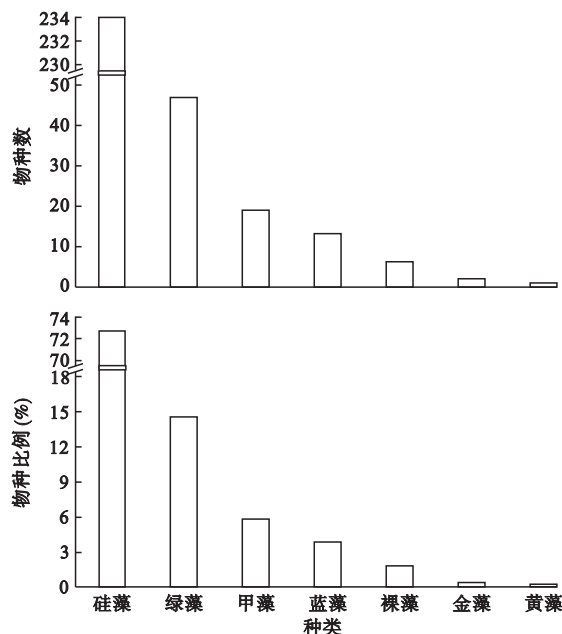


图 2 浮游植物种类组成

Fig. 2 Composition of phytoplankton species

植物种类最多, 为 175 种, S<sub>6</sub> 站最少, 为 110 种。

调查期间, 汕头港内出现频率超过 7 个月的浮游植物主要有中肋骨条藻 (*Skeletonema costatum*)、格氏圆筛藻 (*Coscinodiscus granii*)、星脐圆筛藻 (*C. asteromphalus* var. *asteromphalus*)、琼氏圆筛藻 (*C. jonesianus*)、具槽帕拉藻 (*Melosira sulcata* var. *sulcata*)、丹麦细柱藻 (*Leptocylindrus danicus*)、中华齿状藻 (*Odontella sinensis*)、活动齿状藻 (*O. mobiliensis*)、蜂窝三角藻 (*Triceratium favus*)、笔尖形根管藻 (*Rhizosolenia styliformis* var. *styliformis*)、钟形中鼓藻 (*Bellerochea horlogicalis*)、锚角藻原变种 (*Ceratium tripos* var. *tripos*)、颗粒直链藻 (*Melosira granulata*)、颗粒直链藻极窄变种 (*M. granulata* var. *angustissima*)、泰晤士扭鞘藻 (*Streptotheca tamesis*)、双角马鞍藻 (*Campylodiscus biangulatus*)、派格棍形藻 (*Bacillaria paxillifera*)、叉角藻 (*Ceratium furca*)、类 S 形菱形藻 (*Nitzschia sigmoidea*)、尖布纹藻 (*Gyrosigma acuminatum*)、黄埔水链藻 (*Hydrosera whampoensis*)、菱形海线藻 (*Thalassionema nitzschioides*)、佛氏海线藻 (*T. frauenfeldii*)、薄壁几内亚藻 (*Guinardia flaccida*)、卡普龙双菱藻 (*Surirella capronii*)、扁平多甲藻 (*Protoperdinium depressum*)、棘冠藻 (*Corethron criophilum*)、箱式桥弯藻 (*Cymbella cistula*)、卡氏角毛藻 (*Chaetoceros castracanei*)、并基角毛藻 (*C. decipiens*)、太阳双尾藻 (*Ditylum sol*) 和波状辐辏藻 (*Actinopty-*

*chus undulatus*)等37种。

## 2.2 浮游植物的生态类群

根据浮游植物种类的生态特征和分布特点将汕头港区浮游植物划分为淡水种、半咸水、近岸、外海与广温广盐5个生态类群。

(1)淡水种类群。主要是绿藻和蓝藻,以及少量的羽纹纲硅藻、裸藻、黄藻。主要分布在靠近西港河口的S<sub>5</sub>站,主要代表有绿藻门的被甲栅藻(*Scenedesmus armatus*)、河生集星藻(*Actinastrum fluviatile*)、二角盘星藻(*Pediastrum duplex*)、纤细角星鼓藻(*Staurastrum gracile*),蓝藻门的点形平裂藻(*Merismopedia punctata*),硅藻门的脆杆藻(*Fragilaria* sp.),裸藻门的梭形裸藻(*Euglena acus*)等。

(2)半咸水类群。主要是适应低盐性及半咸水种,代表种有中肋骨条藻、蜂腰双壁藻(*Diploneis bombus*)、深脐圆筛藻(*Coscinodiscus bathyomphalus* var. *bathyomphalus*)、克尼角毛藻(*Chaetoceros knipowitschii*)、颗粒直链藻、椭圆波缘藻(*Cymatopleura elliptica*)、黄埔水链藻、类S形菱形藻、派格棍形藻、大角藻原变种(*Ceratium macroceros* var. *macroceros*)、颤藻(*Oscillatoria* sp.)、节旋藻(*Arthrospira* sp.)等。此类群是汕头港浮游植物的优势类群。

(3)近岸类群。主要分布于沿岸及近海的种类,根据对温度适应范围不同可再分为:(a)温水种近岸类群。其自然分布区的月平均水温为12℃~25℃,代表种有丹麦细柱藻、日本角毛藻(*Chaetoceros nipponica*)、长耳齿状藻(*Odontella aurita*)、尖刺伪菱形藻(*Pseudo-nitzschia pungens*)等。(b)暖水种近岸类群。其自然分布区的月平均水温高于15℃,代表种有矮小短棘藻(*Detonula pumila*)、掌状冠盖藻(*Stephanopyxis palmeriana*)、螺端根管藻(*Rhizosolenia cochlea*)、海洋原甲藻(*Prorocentrum micans*)、拟旋链角毛藻(*Chaetoceros pseudocurisetus*)等。(c)广温种近岸类群:大洋角管藻(*Cerataulina pelagica*)、窄隙角毛藻(*Chaetoceros assinis* var. *affinis*)、波状辐衲藻、环纹娄氏藻(*Lauderia annulata*)、短角弯角藻(*Euccampia zodiacus*)等。

(4)外海类群。为主要分布于外海深水区的高盐性种类,根据对温度适应范围不同可再分为:(a)温水种外海类群。密连角毛藻(*Chaetoceros densus*)、卡氏角毛藻、长辐杆藻(*Bacteriastrum elongatum* var. *elongatum*)等。(b)暖水种外海类群。粗根管藻

(*Rhizosolenia robusta*)、笔尖形根管藻粗径变种(*Rhizosolenia styloformis* var. *latissima*)、后垂角毛藻(*Chaetoceros pendulus*)、钟形中鼓藻、南方星芒藻(*Asterolampra marylandica*)等。(c)广温种外海类群。厚刺根管藻(*Rhizosolenia crassipina*)、佛氏海线藻等。该类群种类和数量均较少,未能形成优势。

(5)广温广盐类群。主要代表种有旋链角毛藻(*Chaetoceros curvisetus*)、柔弱角毛藻(*C. debilis*)、翼根管藻纤细变型(*Rhizosolenia alata* f. *gracillima*)、菱形海线藻、中肋骨条藻、变异辐杆藻(*Bacteriastrum varians*)、离心列海链藻(*Thalassiosira excentrica*)、细弱圆筛藻(*Coscinodiscus subtilis* var. *subtilis*)等。

## 2.3 浮游植物的丰度

调查期间,汕头港浮游植物丰度变化范围是 $60 \times 10^4 \sim 19000 \times 10^4 \text{ cells} \cdot \text{m}^{-3}$ ,平均值为 $3127.6 \times 10^4 \text{ cells} \cdot \text{m}^{-3}$ 。浮游植物丰度的时间分布情况如图4A,5—8月浮游植物丰度则明显高于其他月份,其中,5月的浮游植物丰度最高,均值为 $9816.7 \times 10^4 \text{ cells} \cdot \text{m}^{-3}$ ;11—2月浮游植物丰度则明显低于其他月份,其中,11月最低,浮游植物丰度均值仅为 $146.67 \times 10^4 \text{ cells} \cdot \text{m}^{-3}$ 。浮游植物丰度的空间分布情况是 $S_3 > S_5 > S_4 > S_1 > S_2 > S_6$ ,S<sub>3</sub>和S<sub>5</sub>站浮游植物丰度均值高于其他站点,但这两站浮游植物组成有差异,S<sub>3</sub>站以海生种为主(占该站浮游植物总丰度的74.48%),S<sub>5</sub>站以淡水种为主(占该站浮游植物总丰度的78.40%);S<sub>6</sub>站浮游丰度最低,均值是 $1898.1 \times 10^4 \text{ cells} \cdot \text{m}^{-3}$ (图3)。

淡水种浮游植物丰度范围是 $0 \sim 18400 \times 10^4 \text{ cells} \cdot \text{m}^{-3}$ ,平均值是 $1410 \times 10^4 \text{ cells} \cdot \text{m}^{-3}$ ,占浮游植物总数的45.13%。所有调查样品中有7个样品中未观察到淡水种浮游植物。时间上分布是6—10月明显高于其他月份,其中,7月最高,丰度范围是 $925 \times 10^4 \text{ cells} \cdot \text{m}^{-3} \sim 18400 \times 10^4 \text{ cells} \cdot \text{m}^{-3}$ ,11月最低,丰度范围是 $0 \sim 15 \times 10^4 \text{ cells} \cdot \text{m}^{-3}$ ;空间分布则是从汕头港湾口向西到西港河口依次递增,而S<sub>6</sub>则略低于S<sub>2</sub>站(图4B)。浮游植物与淡水种浮游植物明显的相关( $r=0.753, P<0.01$ )则进一步表明了汕头港浮游植物组成中淡水种浮游植物比重较高。

## 2.4 浮游植物的多维尺度分析

对汕头港浮游植物组成进行多维尺度分析(图5),发现汕头港浮游植物组成的时空分布具有明显差异。时间分布上,浮游植物组成可以分成3类:



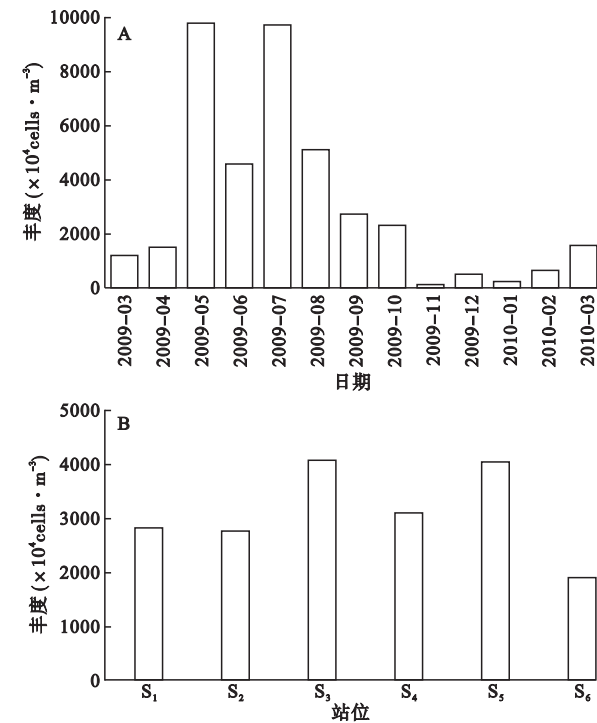


图3 浮游植物丰度均值的时空走势  
Fig.3 Distribution of phytoplankton abundance  
A, 时间尺度; B, 空间尺度。

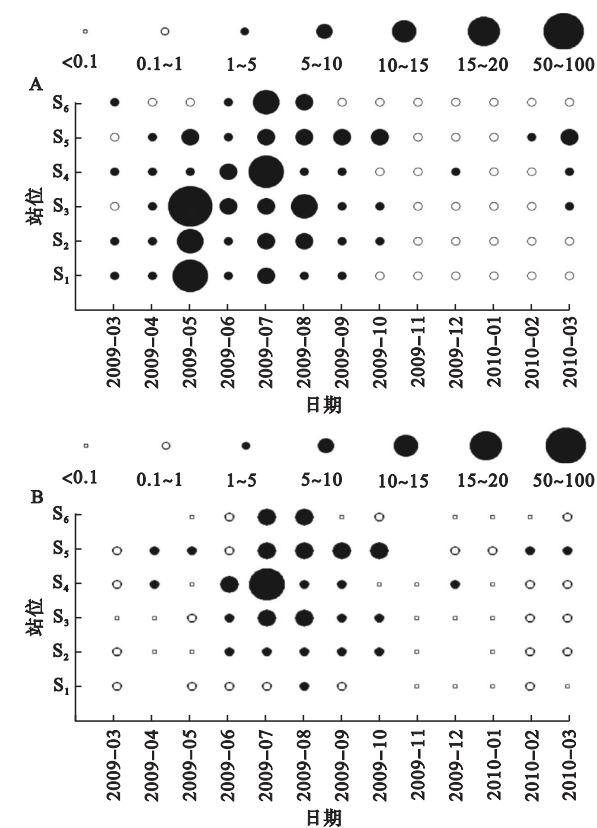


图4 浮游植物丰度(A)和淡水种浮游植物丰度(B)的时空分布 ( $\times 10^7 \text{ cells} \cdot \text{m}^{-3}$ )  
Fig.4 Distribution of phytoplankton (A) and freshwater phytoplankton (B) abundance

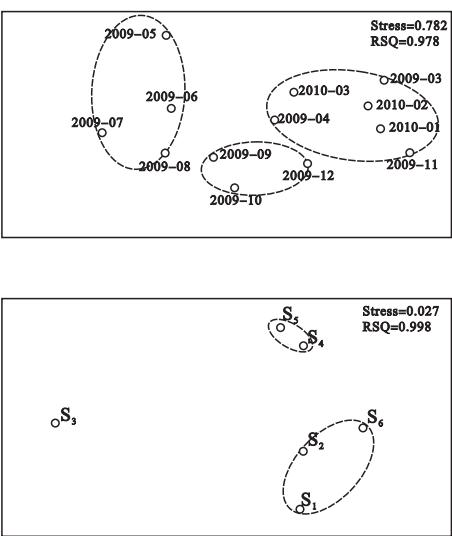


图5 浮游植物数量组成的多维尺度分析  
Fig.5 MDS ordination of sampling months and stations from phytoplankton species abundance

5—8月组成一类,这与浮游植物丰度分布一致;9、10、12月为一组;1、2、3、4、11月这6个月成一组。其中,5月与11月的差异度最大。空间分布上,浮游植物组成亦成3组;S<sub>1</sub>、S<sub>2</sub>、S<sub>6</sub>为一组,以近岸类群为主;S<sub>4</sub>、S<sub>5</sub>为一组,以淡水种和半咸水类群为主;S<sub>3</sub>独为一组,以半咸水和近岸类群为主。其中,S<sub>3</sub>站与S<sub>6</sub>站的差异度最大。

2.5 优势种

调查期间,汕头港各月优势种共27种(含10个属)(表1)。优势种分布较为分散,其中有14种仅出现在1个月。1月优势种种数最多,达到9种,而10月仅有一优势种——颤藻。8月的淡水种优势种最多,为7种。中肋骨条藻仅在10、11月为非优势种,其在调查期间的平均优势指数为20.07%,优势度是0.066,为全年优势种;另一全年优势种是颤藻,其优势度约为0.038。

中肋骨条藻丰度均值为  $381 \times 10^4 \text{ cells} \cdot \text{m}^{-3}$ 。其时间分布呈现3—9月明显高于10—2月,其中5、7月尤其高,超过了  $1000 \times 10^4 \text{ cells} \cdot \text{m}^{-3}$ ,10—2月的平均丰度都低于  $100 \times 10^4 \text{ cells} \cdot \text{m}^{-3}$ ;空间分布则呈现从湾口向西依次降低,在处于牛田洋的S<sub>6</sub>略有升高,这可能是受濠江影响(图6)。

颤藻丰度均值为  $817 \times 10^4 \text{ cells}$ 。出现颤藻的月份是5—10月和12月,其中,7—10月颤藻的平均丰度都在  $1500 \times 10^4 \text{ cells} \cdot \text{m}^{-3}$ 以上,7月的平均丰度最高,为  $2800 \times 10^4 \text{ cells} \cdot \text{m}^{-3}$ 。颤藻的空间分布则

表 1 汕头港主要优势种的月变化趋势  
Table 1 Succession in main dominant species in Shantou Harbor

优势种	日期
颗粒直链藻 <i>Melosira granulata</i>	2009-08,09,2010-01
颗粒直链藻极窄变种 <i>M. granulata</i> var. <i>angustissima</i>	2009-08,2010-02,03
颗粒直链藻极窄变种螺旋变型 <i>M. granulata</i> var. <i>angustissima</i> f. <i>spiralis</i>	2009-08
细弱明盘藻 <i>Hyalodiscus subtilis</i>	2010-01
圆筛藻 <i>Coscinodiscus</i> sp.	2009-03,04,11,12,2010-01,02
小环藻 <i>Cyclotella</i> sp.	2010-01
海链藻 <i>Thalassiosira</i> spp.	2009-05,06,2010-01
圆海链藻 <i>T. rotula</i>	2009-05
诺氏海链藻 <i>T. nordenskiöldii</i>	2009-05
中肋骨条藻 <i>Skeletonema costatum</i>	2009-03,09,12,2010-01,03
角毛藻 <i>Chaetoceros</i> spp.	2010-02
旋链角毛藻 <i>C. curvisetus</i>	2009-05
钟形中鼓藻 <i>Bellerochea horlogicalis</i>	2009-11
日本星杆藻 <i>Asterionella japonica</i>	2009-07
华丽星杆藻 <i>A. formosa</i>	2010-02,03
舟形藻 <i>Navicula</i> sp.	2009-03,04
曲舟藻 <i>Pleurosigma</i> sp.	2009-11,2010-01
针杆藻 <i>Synedra</i> sp.	2010-01
菱形藻 <i>Nitzschia</i> sp.	2009-03,06,2010-03
河生集星藻 <i>Actinastrum fluviatile</i>	2009-04,08,2010-02,03
弓形藻 <i>Schroederia</i> sp.	2010-01,03
爪哇栅藻 <i>Scenedesmus javaensis</i>	2010-02
被甲栅藻 <i>S. armatus</i>	2009-03
平裂藻 <i>Merismopedia</i> sp.	2010-07,09,12,2010-01
颤藻 <i>Oscillatoria</i> sp.	2009-06,10,12
节旋藻 <i>Arthrospira</i> sp.	2009-08
鱼腥藻 <i>Anabaena</i> sp.	2009-08

是处于西港河口附近的 S<sub>5</sub> 站平均丰度最高,湾口的 S<sub>1</sub> 站和牛田洋的 S<sub>6</sub> 站的平均丰度则是最低的(图 6)。

2.6 浮游植物多样性

调查期间,汕头港浮游植物群落的 Shannon 指数均值是 2.53。从时间分布上分析可知,汕头港有 10 个月 Shannon 指数均值是 2~3,2010 年 1、2 月的 Shannon 指数均值是 3~4,仅有 10 月的是 1~2,且 10 月 Shannon 指数变化幅度明显大于其他月份;从空间分布上分析可知,各站点的 Shannon 指数均值是 2~3,湾口的 S<sub>1</sub> 站的 Shannon 指数均值最高,调查期间波动最小,处于西港河口附近的 S<sub>5</sub> 站 Shannon 指数波动最大(图 7)。

均匀度指数(*J*)能够反映了调查区域物种丰富程度。汕头港均匀度指数月均值变化趋势与 Shannon 指数一致,最低值是在 10 月,为 0.42,2 月最高,是 0.70;空间变化上则是与 Shannon 指数相似,整体呈“W”状分布;S<sub>6</sub> 站均匀度指数均值最高,是

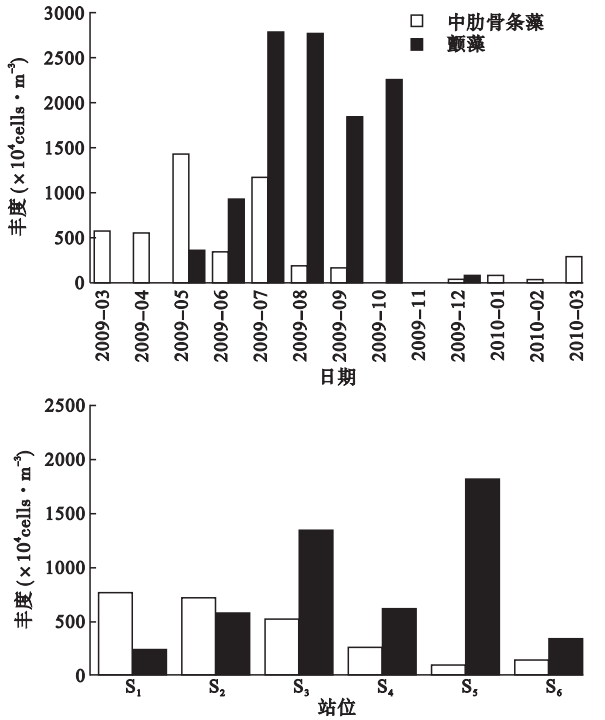


图 6 中肋骨条藻和颤藻丰度的时空分布  
Fig. 6 Spatial and temporal distribution of *Skeletonema costatum* and *Oscillatoria* sp. abundance

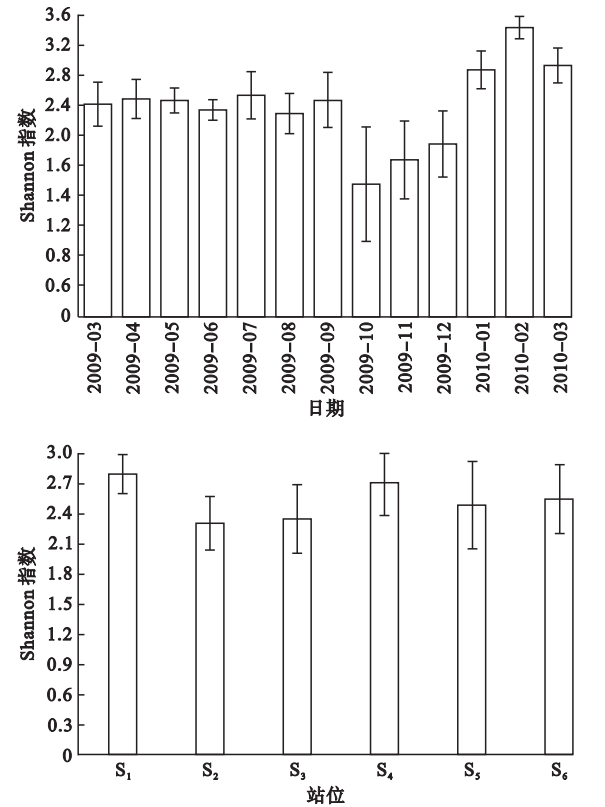


图 7 浮游植物 Shannon 指数的时空分布  
Fig. 7 Distribution of Shannon index

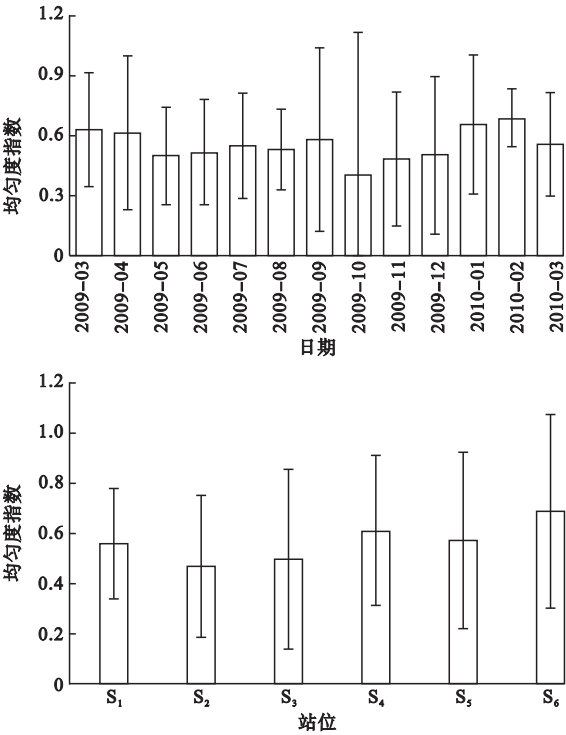


图 8 浮游植物均匀度指数的时空分布  
Fig. 8 The distribution of evenness index

表 2 浮游植物与环境因子间的相关性分析

Table 2 Correlations between the abundance and structure of phytoplankton community and environmental factors

	COD	温度	盐度	pH	透明度	叶绿素 a
浮游植物	-0.284 *	0.462 *	-0.034	-0.215	0.421	0.464 *
淡水种微藻	0.021	0.479 *	-0.365 *	-0.195 **	0.198	0.487 *
蓝藻	0.008	0.637 *	-0.318 *	-0.345 *	0.126	0.525 *
裸藻	0.034	0.159	-0.144	-0.029	0.104	0.241 **
甲藻	-0.245 **	-0.082	0.090	0.179	0.434	0.015
绿藻	0.136	0.102	-0.404 *	-0.167	0.186	0.404 *
羽纹纲硅藻	-0.226	0.078	0.015	-0.028	0.547 *	0.069
中心纲硅藻	-0.479 *	0.166	0.300 *	0.016	0.560 *	0.177
中肋骨条藻	-0.626 *	-0.009	0.344	0.131	0.678 *	0.017
浮游植物组成	-0.210	-0.699 *	0.390 *	0.438 *	0.107	-

\*  $P<0.01$ , \*\*  $P<0.05$ 。

3 讨 论

3.1 生物多样性与污染水平的关系

此次调查汕头港浮游植物丰度均值明显高于汕头港(1991—1992 年)和粤东海区的调查结果,2008 年榕江入海主要污染物约  $8.1\times10^6$  kg,其中 COD 占 90.5%、氨氮和亚硝酸盐氮 5.1%,同时此次调查的营养盐含量明显高于后两者(陈则实,1997;王云龙等,2005;汕头市海洋与渔业局,2009),这就表明汕头港近 20 年富营养化程度明显加重。但汕头港浮

0.69, $S_2$ 站最低,为 0.47; $S_1$ 站波动幅度最小, $S_3\sim S_6$  波动幅度相近(图 8)。

2.7 浮游植物分布与环境因子的关系

浮游植物与环境因子的相关性分析结果如表 3 所示。浮游植物与营养盐的相关性不强。浮游植物、甲藻、中心纲硅藻与 COD 呈负相关,其中,中肋骨条藻与 COD 的线性关系明显( $r=-0.626$ )。浮游植物、淡水种浮游植物、蓝藻和裸藻与 DO 呈负相关,蓝藻的相关性略微好些( $r=-0.414$ )。浮游植物、淡水种浮游植物和蓝藻与海水温度正相关( $r=0.462$ ,  $0.479$ ,  $0.637$ ,  $P<0.01$ )。此外,汕头港浮游植物组成与温度明显相关( $r=-0.699$ ,  $P<0.01$ ),这就表明汕头港游植物组成是随季节变化而明显更替。淡水种浮游植物、蓝藻、绿藻与盐度负相关,而中心纲硅藻与之正相关。淡水种浮游植物、蓝藻与 pH 亦呈负相关。浮游植物、甲藻、硅藻与透明度正相关,其中,中肋骨条藻与之相关性较强( $r=0.678$ )。叶绿素 a 与蓝藻相对较强( $r=0.525$ )。浮游植物群落结构主要受温度、pH 与盐度影响(表 2)。

游植物丰度明显低于珠江口、长江口和厦门西海域(林金美,1991;Huang *et al.*, 2004; Gao & Song, 2005),这说明汕头港富营养化水平低于东南部其他经济发达地区的海域。

养殖水域的生物多样性与水体营养化水平密切相关(Telesh,2004),那么能够反映河口浮游生物群落的结构与功能稳定性的指示性参数(Gao & Song, 2005),如 Shannon 指数,就可以用于反映河口生态系统的富营养水平或污染程度(Telesh, 2004)。Shannon 指数与均匀度指数走势相同和 Shannon 指

数与浮游植物丰度相关,这就印证了物种丰富程度对物种浮游生物多样性的影响很小,研究浮游生物多样性时应优先考虑 Shannon 指数 (Gao & Song, 2005)。根据 Hendley (1977) 将 Shannon 指数反映浮游植物群落的多样性程度分为 4 个等级:  $H' = 0 \sim 1$  为高污染,  $H' = 1 \sim 2$  为中度污染,  $H' = 2 \sim 3$  为轻度污染,  $H' = 3 \sim 4$  为轻微污染, 调查期间汕头港浮游植物多样性整体水平处于轻度污染, 而 10、11 月的汕头港浮游植物多样性水平则处于中度污染 (图 6A)。与珠江口和长江口相比, 汕头港 Shannon 指数较高, 这就表明汕头港浮游植物生物多样性相对较高 (Huang *et al.*, 2004; Gao & Song, 2005)。

### 3.2 优势种的差异比较

与 1991—1992 年那次的研究相比, 汕头港的优势种只有中肋骨条藻地位未变, 原来的夏季优势种笔尖形根管藻、丹麦细柱藻和布氏双尾藻则被圆海链藻和诺氏海链藻取代, 而秋季 (9—10 月) 其他硅藻未出现在优势种之列。中肋骨条藻作是全年优势种, 则因为其是广温广盐广布的种类, 对各种生态条件有广泛的适应能力, 具有较高的生长率且易在富营养化水域大量繁殖; 而汕头港地处榕江口, 营养盐丰富, 适宜中肋骨条藻大量繁殖。此外, 它是粤东海区主要的优势种, 在柘林湾与深澳湾为全年优势种, 其中在深澳湾年度优势指数超过了 50% (杜虹等, 2003; 周凯等, 2003; 王云龙等, 2005; 王亮根等, 2010)。在珠江口、长江口、杭州湾、厦门西海域等其他南方海域也是主要优势种之一 (林金美, 1991; Huang *et al.*, 2004; Gao & Song, 2005; 秦铭俐等, 2008)。

### 3.3 环境因子对浮游植物组成的影响

汕头港浮游植物组成与浮游植物和各主要类群以及它们与叶绿素 a 的相关性分析结果表明, 汕头港受淡水种浮游植物影响明显。而与叶绿素 a 的线性相关不强的可能原因是水体中的叶绿素 a 包括了初级生产者的活体叶绿素及其死亡产生的有机碎屑中的叶绿素; 此外, 淡水种浮游植物、蓝藻、绿藻与叶绿素 a 的相关性较强而与甲藻、硅藻不相关则暗示很多淡水种浮游植物因为相对更为微小而未被统计。

浮游植物组成受到盐度、温度、营养盐与光照等环境因子影响。多维尺度分析显示汕头港浮游植物结构组成受到温度和盐度影响 (图 5), 这与浮游植物和环境因子间的相关性分析结果一致 (表 2)。由

汕头港富营养化水平较高, 浮游植物组成受营养盐影响不明显。其次 COD 也是限制河口区浮游植物的生长的因子之一 (Konx, 1986; Fisher *et al.*, 1988; Harrison *et al.*, 1991; Turner & Rabalais, 1994; Huang *et al.*, 2004), 2008 年榕江输入汕头港的 COD 约  $7.34 \times 10^6$  kg (汕头市海洋与渔业局, 2009) 和汕头港浮游植物丰度与 COD 呈负相关, 都表明了 COD 是汕头港浮游植物生长的限制因素之一, 且对中心纲硅藻影响最大 (表 2)。此外, 高混浊的海水也会限制浮游植物的生长 (Fisher *et al.*, 1988; Cloern, 1999; Gao & Song, 2005), 浮游植物与透明度的正相关就印证了这一点 (表 2)。

汕头港生态类群结构变化与污染因子有相关性不强, 这与该海湾生态类群结构受温度和盐度影响显著有关 (表 2), 葡萄牙的 Tagus 河口的情况类似 (Brogueira *et al.*, 2007)。不同生态类群与环境因子的相关性则可以指示污染物来源, 如蓝藻、裸藻与 DO、氨态氮和 pH 的负相关则有可能是因为上游输入淡水藻的同时将大量污染物一并输入 (Gómez & Bauer, 1998b); 亚硝酸盐、COD 与中肋骨条藻、中心纲硅藻、甲藻的负相关则可证明上游输入在汕头港的亚硝酸盐与 COD 的污染中扮演重要角色。

本研究将 MDS 与 Pearson 相关性分析相结合, 分析了汕头港浮游植物结构组成与环境因子之间的关系, 量化了浮游植物结构组成与环境因子之间的关系, 为环境因子对生物群落结构影响提供量化的可能。将其与各类群浮游植物与环境因子间的相关性分析结合, 就可得出环境因子对浮游植物群落结构影响程度。本研究发现, 汕头港的浮游植物群落结构受温度影响明显, 尤其表现在蓝藻上; 而盐度对汕头港浮游植物群落结构的影响, 则主要体现在蓝藻和绿藻。表明, 富营养化水平下河口型海湾的浮游植物群落结构主要受季节变化、淡水输入与潮汐的影响。

## 4 结 论

本次调查共鉴定出汕头港浮游植物 322 种, 分属蓝藻、黄藻、金藻、甲藻、硅藻、裸藻和绿藻 7 门 9 纲 19 目 40 科 114 属。其中, 硅藻种类最多, 计 234 种, 占 72.6%。共发现 141 种淡水和半咸水种与 64 种赤潮种。

浮游植物、淡水浮游植物丰度年均值分别为  $3130 \times 10^4$  和  $1410 \times 10^4$  cells · m<sup>-3</sup>。二者显著相关



( $r=0.753, P<0.01$ ), 周年变动模式为单峰型(高峰分别位于7月, 低谷在11月)。

Shannon 指数与均匀度指数均值分别是范围分别是 2.53、0.57。二者在时间分布走势一致, 10 月最低, 2 月最高。空间差异为  $S_1$ 、 $S_4$ 、 $S_6$  的 Shannon 指数依次减小, 而均匀度指数依次增大。

中肋骨条藻和颤藻是该湾的全年优势种, 优势度为 0.066 和 0.038。浮游植物组成从时间和空间上各分成 3 组, 浮游植物群落结构主要受温度、pH 和盐度控制, 浮游植物生长则受透明度和 COD 限制。MDS 与相关性分析结合可获取环境因子对浮游植物群落结构的影响程度。

## 参考文献

- 陈则实. 1997. 中国海湾志(第9分册). 北京: 海洋出版社.
- 杜虹, 黄长江, 陈善文, 等. 2003. 2001–2002 年粤东柘林湾浮游植物的生态学研究. 海洋与湖沼, **34**(5): 604–617.
- 国家海洋局. 1991. GB/T 12763.6–1991 海洋调查规范(第6部分): 海洋生物调查. 北京: 中国标准出版社.
- 林金美. 1991. 厦门西海域浮游植物的生态. 台湾海峡, **10**(4): 345–350.
- 秦铭俐, 魏永杰, 王晓波, 等. 2008. 杭州湾枯水期浮游植物群落结构的研究. 海洋环境科学, **27**(增刊1): 57–60.
- 汕头市海洋与渔业局. 2006. 2005 年汕头市海洋环境质量公报[EB/OL]. [2010-12-23] <http://www.soa.gov.cn/soa/hygb/yhgb/five/webinfo/2008/01/1271382649849764.htm>.
- 汕头市海洋与渔业局. 2007. 2006 年汕头市海洋环境质量公报[EB/OL]. [2010-12-23] <http://www.gov.cn/soa/hygblyhgb/sin/webinfo/2008/01/27/271382649796269.htm>.
- 汕头市海洋与渔业局. 2008. 2007 年汕头市海洋环境质量公报[EB/OL]. [2010-12-23] <http://www.soa.gov.cn/soa/hygblyhgb/seven/webinfo/2008/05/27138264975617.htm>.
- 汕头市海洋与渔业局. 2009. 2008 年汕头市海洋环境质量公报[EB/OL]. [2010-12-23] <http://www.soa.gov.cn/soa/hygb/yhgb/eight/webinfo/2009/05/1271382649742611.htm>.
- 王云龙, 沈新强, 李纯厚. 2005. 中国大陆架及邻近海域浮游生物. 上海: 上海科技出版社.
- 王亮根, 杜虹, 陈伟洲, 等. 2010. 深澳湾浮游植物群落特征及其多样性研究. 生态科学, **29**(3): 200–206.
- 徐兆礼, 陈亚瞿. 1989. 东黄海秋季浮游动物优势种聚集强度与鲈鱼渔场的关系. 生态学杂志, **8**(4): 13–15.
- 周凯, 黄长江, 姜胜, 等. 2002. 2000–2001 年柘林湾浮游植物群落结构及数量变动的周年调查. 生态学报, **22**(5): 688–698.
- Brogueira MJ, Oliveira MR, Cabeddas G. 2007. Phytoplankton community structure defined by key environmental variables in Tagus estuary, Portugal. *Marine Environmental Research*, **64**: 616–628.
- Cloern JE. 1999. The relative importance of light and nutrient limitation of phytoplankton growth: A simple index of coastal ecosystem sensitivity to nutrient enrichment. *Aquatic Ecology*, **33**: 3–16.
- Fisher TR, Harding LW, Stanley DW, et al. 1988. Phytoplankton, nutrient, and turbidity in the Chesapeake, Delaware, and Hudson estuaries. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, **27**: 61–93.
- Gao XL, Song JM. 2005. Phytoplankton distributions and their relationship with the environment in the Changjiang Estuary, China. *Marine Pollution Bulletin*, **50**: 327–335.
- Gómez N, Bauer DE. 1998b. Phytoplankton from the Southern Coastal Fringe of the Río de la Plata (Buenos Aires, Argentina). *Hydrobiologia*, **380**: 1–8.
- Harrison PJ, Clifford PJ, Cochlan WP. 1991. Nutrient and phytoplankton dynamics in the Fraser River plume, Strait of Georgia, British Columbia. *Marine Ecology Progress Series*, **70**: 291–304.
- Hendley NI. 1977. The species diversity index of some inshore diatoms communities and its use in assessing the degree of pollution insult on parts of the North Coast of Cornwall// Reimer S, ed. Fourth Symposium on Recent and Fossil Marine Diatoms. Vaduz, Liechtenstein: Cramer J.
- Huang LM, Jian WJ, Song XY, et al. 2004. Species diversity and distribution for phytoplankton of the Pearl River estuary during rainy and dry seasons. *Marine Pollution Bulletin*, **49**: 588–596.
- Konx GA. 1986. Estuarine Ecosystems: A System Approach (vol. 1.). Boca Raton, Florida: CRC Press.
- Livingston RJ. 2001. Eutrophication processes in coastal systems: origin and succession of plankton blooms and effects on secondary production in Gulf Coast Estuaries Center for Aquatic Research and Resource Management. Boca Raton, Florida: CRC Press.
- McNaughton SJ. 1967. Relationship among functional properties of California grassland. *Nature*, **216**: 168–169.
- Pielou EC. 1969. An introduction to mathematical ecology. New York: Wiley Interscience.
- Shannon CE, Weaver W. 1949. The Mathematical Theory of Communication. Urbana, IL: University of Illinois Press.
- Telesh IV. 2004. Plankton of the Baltic estuarine ecosystems with emphasis on Neva Estuary: A review of present knowledge and research perspectives. *Marin Pollution Bulletin*, **49**: 206–219.
- Turner RE, Rabalais NN. 1994. Coastal eutrophication near the Mississippi river delta. *Nature*, **368**: 619–621.

作者简介 杜虹, 女, 1976 年 4 月, 博士。从事从事近岸水域生态环境保护相关工作。E-mail: hdu@stu.edu.cn  
责任编辑 李凤芹